

Physik im Nanobereich

Henzler, Martin

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2003 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.44-51



J. Cramer Verlag, Braunschweig

MARTIN HENZLER, Hannover

Physik im Nanobereich

Braunschweig, 07.03.2003*

Einführung

Die Nanotechnologie hat durch den Bedarf an immer kleineren Strukturen für integrierte Schaltungen gleichermaßen an technologischem wie grundsätzlichem Interesse zugenommen. In der Grundlagenforschung interessiert zum Beispiel, was sich an der klassischen Beschreibung vieler Phänomene ändert, wenn die Abmessungen der Strukturen immer kleiner werden, d.h. in mindestens einer Dimension die Ausdehnung im Bereich weniger Nanometer liegt. Damit sind die Strukturen nur noch wenige Atomabstände groß, also Schichten mit wenigen Atomlagen Dicke, bzw. wenige Atomreihen Breite oder Kluster mit wenigen Atomen. Uns interessiert hier besonders die Frage der Leitungsmechanismen für den elektrischen Strom und dessen Abhängigkeit von strukturellen Parametern. Die klassische Beschreibung (Ohm'sches Gesetz und Boltzmann's Theorie) geht von frei beweglichen Ladungsträgern aus, die sich im Material eine kurze Strecke frei bewegen und dann nach einer Streuung sich wieder frei bewegen. Über die Mittelung vieler Wegstücke kommt der „konstante“ Stromfluss zustande. Was ändert sich, wenn die Abmessungen in mindestens einer Richtung kleiner als die sogenannte freie Weglänge ist? Hier ist mit prinzipiellen Änderungen der Mechanismen zu rechnen, da dann auch die Wellennatur der Ladungsträger wesentlich in Erscheinung treten kann.

Herstellung wohldefinierter Nanostrukturen

Wenn man Phänomene im Nanobereich untersuchen will, muss man erst wohldefinierte Nanostrukturen herstellen. Wohldefiniert heißt, dass die atomare Zusammensetzung und die atomare Anordnung bekannt, am besten einfach (nur eine Atomsorte) und periodisch ist.

Da sich freitragende Strukturen mit einfachen Metallen nicht realisieren lassen, haben wir epitaktische Schichten auf möglichst fehlerfreien isolierenden Unterlagen im Ultrahochvakuum erzeugt. Die Silizium-(111)-Fläche lässt sich in großen Flächen praktisch fehlerfrei erzeugen. Wir konnten darauf Ag- und Pb-Schichten epitaktisch mit der jeweiligen Volumenstruktur des Metalls in einzelnen Monolagen aufwachsen und im gleichen Ultrahochvakuum bei tiefen Temperaturen (flüssiges Helium) und bei hohen Magnetfeldern (bis 4 Tesla) den Transport von Gleichstrom studieren. Dabei kommt uns zugute, dass Silizium bei tiefen Temperaturen isoliert, die Messung also ganz durch die ultradünnen

* Kurzfassung eines Vortrags gehalten in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

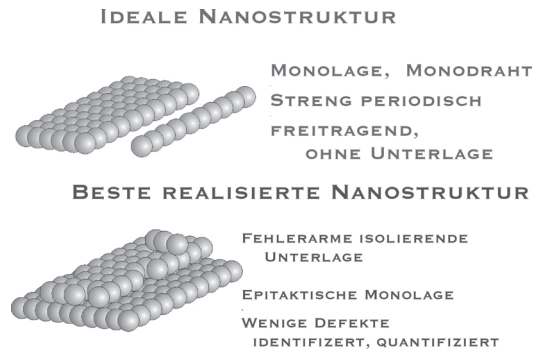


Bild 1: Ideale und die beste realisierte Nanostruktur.

Metallschichten gegeben ist. Durch die Epitaxie ist die Schicht in periodischer Anordnung herstellbar, durch das Ultrahochvakuum bleibt sie über Stunden frei von Veränderungen durch Adsorbate und durch das Magnetfeld sind die besten Rückschlüsse auf den Leitungsmechanismus möglich.

Die Struktur einschließlich der Baufehler konnte während des Wachstums mit Hilfe der hochauflösenden Elektronenbeugung (Profilanalyse bei der Beugung langsamer Elektro-

Structure of Pb films on Si(111) 7x7

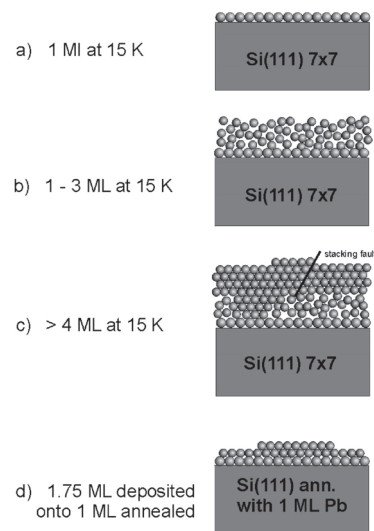


Bild 2: Struktur von Bleischichten nach Aufdampfen bei 15 K auf die reine Si(111)7x7, bzw. auf eine ausgeheilte Monolage von Pb.

nen) bestimmt werden. Damit standen verschiedene Schichtdicken und Strukturen für die Messung der elektrischen Daten zur Verfügung. Durch Temperprozesse wurde die Vielfalt der Strukturen weiter erhöht.

Leitwerte von dünnen epitaktischen Pb-Schichten

Die folgenden Beispiele sollen zeigen, wie sehr die Leitwerte von einer einfachen Beschreibung mit klassischen Hilfsmitteln abweichen. Das erste Beispiel zeigt die Bildung einer zusammenhängenden ersten Monolage durch die erste Leitung durch die Schicht an (Perkolation bei etwa 0,7 Monolagen).

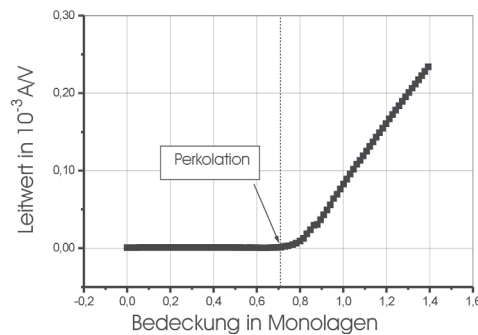


Bild 3: Leitwert während des Wachstums der ersten Pb-Monolage auf Si(111)9 bei 15 K.

Das zweite Beispiel soll den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Leitwert zeigen (Bild 4). Hierfür wurden erst 12 Monolagen aufgedampft und ausgeheilt, um eine möglichst stufenfreie Ausgangsfläche zu erzeugen. Auf diese Fläche wurde bei tiefer Temperatur (15K) wiederum Pb aufgedampft, sodass die Rauigkeit durch Inselbildung und Schließen der Schicht bei kompletten Monolagen oszillierte (mit LEED im Detail nachgewiesen). Besonders auffällig ist die erste Abnahme des Leitwertes, da die Streuung durch die Rauigkeit eine Leitwärtsabnahme bewirkt, die größer ist als die Zunahme durch die wachsende Schichtdicke. Die nachfolgenden Leitwertsoszillationen sind durch Differenzbildung mit der mittleren Geraden gut nachweisbar. Sie folgen den Oszillationen der Rauigkeit beim Wachstum.

Aus der Temperaturabhängigkeit der Leitwerte je nach Schichtdicke sind weitere Informationen über die Leitfähigkeitsmechanismen zu bekommen (Bild 5). Erst für Schichtdicken über 4 Monolagen entspricht der Temperaturkoeffizient den Volumeneigenschaften einschließlich der Supraleitung. Der starke Anstieg beim ersten Aufwärmen von 4 Monolagen ist durch die gleichzeitige Umwandlung von amorph nach kristallin bedingt. Der entgegengesetzte Temperaturkoeffizient für die dünneren Schichten deutet auf einen wesentlich anderen Leitungsmechanismus hin, der im Bereich der starken Lokalisation liegen sollte.

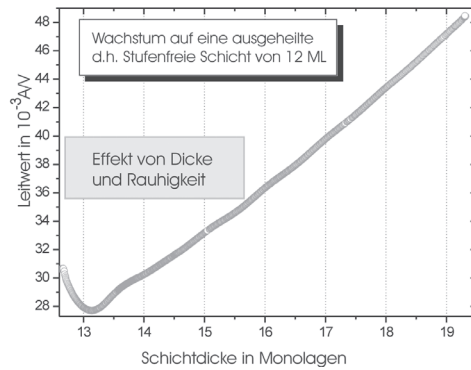


Bild 4: Leitwert während des Wachstums von Pb auf eine ausgeheilte Pb-Schicht.

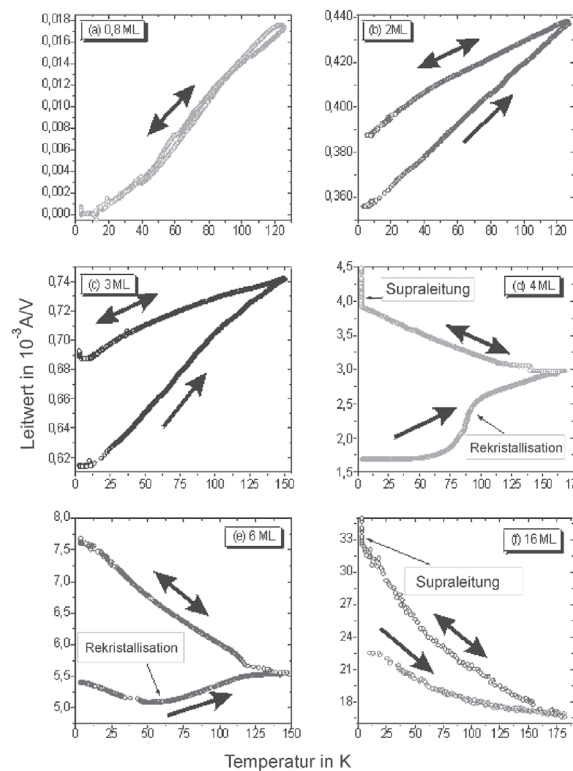


Bild 5: Leitwerte von Pb-Schichten beim ersten Aufwärmen nach Abscheidung auf Si(111) 7x7 und beim wiederholten Aufwärmen für verschiedene Schichtdicken nach Ausheilen der Schichten

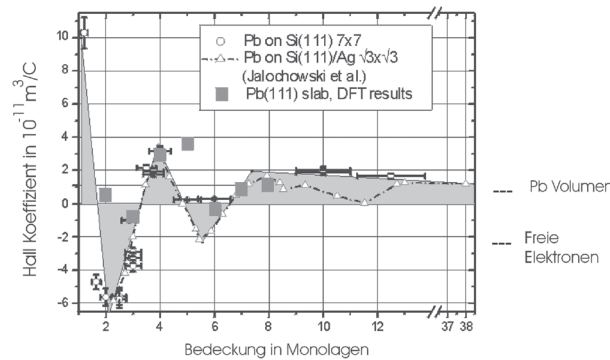
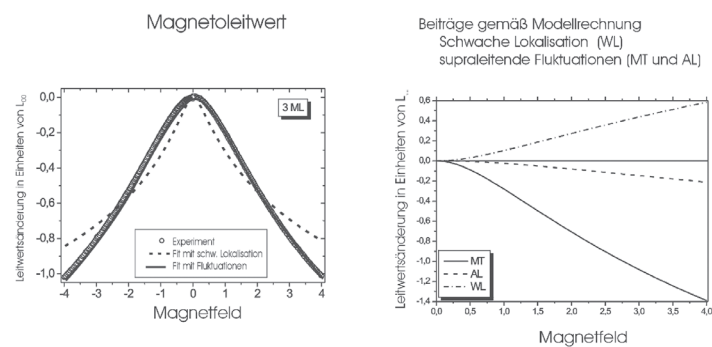


Bild 6: Halleffekt von Pb-Schichten verschiedener Dicke bei tiefen Temperaturen

Weitere neue Einsichten sind durch den Hall-Effekt gegeben. Auffällig ist das wechselnde Vorzeichen des Halleffektes mit steigender Schichtdicke, d.h. ein Wechsel des dominanten Ladungsträgertyps mit der Schichtdicke. Die Bandstruktur ändert sich offensichtlich dramatisch mit der Schichtdicke. Dies wurde durch Rechnungen an frei tragenden Schichten bestätigt. Da amorphe und kristalline Schichten für die gleiche Dicke den gleichen Hall-Effekt zeigen, ist der Vergleich mit der Rechnung an freitragenden Schichten gut begründet. Die Bandstrukturänderungen mit steigender Schichtdicke zeigen den Einfluss der Quantisierung senkrecht zur Oberfläche.

Weitere Informationen liefert der Magnetoleitwert, d.h. die Änderung des Leitwertes mit dem Magnetfeld. (Bild 7). Erst die Einbeziehung von schwacher Lokalisation und von supraleitenden Fluktuationen ermöglicht eine hervorragende Anpassung der Messwerte an gerechnete Kurven. Gleichzeitig liefert diese Anpassung viele wesentliche Parameter für den Leitungsmechanismus wie die elastische Streuzeit τ_{el} , die inelastische Streuzeit τ_i ,

Bild 7: Leitwertsänderung im Magnetfeld:
Messung und Anpassung an theoretische Modelle

die Spin-Bahn-Streuzeit τ_{so} und die Sprungtemperatur der Supraleitung T_C . Dadurch lassen sich die strukturellen Parameter und die strukturellen Defekte mit Transportparametern weitgehend korrelieren. Das Experiment liefert also mit den strukturellen Parametern und den elektrischen Messungen über die Anpassung an die Theorie detaillierte Aussagen über die wechselseitige Korrelationen. Damit ist zwar der Leitungsmechanismus insbesondere bei den ganz dünnen Schichten noch nicht beschrieben, es sind jedoch die Eigenschaften offen gelegt, die eine Theorie zur vollständigen Beschreibung nutzen sollte. Mit Hilfe der oberflächen-physikalischen Methoden sind also die Strukturparameter direkt an den Schichten bestimmt worden, die für die elektrischen Messungen im gleichen Vakuum bei der gleichen tiefen Temperatur verwendet worden sind.

Korrelation von		
Struktur	und	elektrischen Eigenschaften
Pseudomorph ($d < 1$ ML)		isolierend bei tiefen Temperaturen
amorph ($1 < d < 4$ ML)		Leitwert $g \sim d$, sehr kleines τ_s
epitaktisch ($d > 4$ ML)		$g \sim d^2$ $x > 1$
Relevante Strukturfehler		
Stufen (Rauigkeit, Korrelationslänge)		g oszilliert mit d Supraleitung ist korreliert
Zwischenfläche zur Unterlage		wesentlicher Streuer
Korngrenzen		Einfluss beim Tempern nachgewiesen
thermische Bewegung		unabhängig von Struktur

Bild 8: Übersicht über Korrelationen von Struktur und elektrischen Eigenschaften bei ultradünnen epitaktischen Pb-Schichten

Erste Versuche mit Nanodrähten

Für die Herstellung von Nanodrähten werden zwei Wege beschritten:

Wir stellen lithographisch auf Silizium sehr schmale Kanäle im Oxid her und wachsen in den Kanälen Metallschichten epitaktisch auf, sodass die Drähte so gut definiert sind wie die Schichten.

Das zweite Verfahren benützt vicinale Siliziumflächen wie die Si(557), die nach geeigneter Wärmebehandlung eine regelmäßige Stufenstruktur mit einer Terrassenbreite von 5,7 nm zeigen. Wenn man auf diese Stufen wenig Metall aufdampft und tempert, lagert sich das Metall an den Stufenkanten an und bildet viele parallele atomare Drähte, die wiederum im gleichen Vakuum strukturell und elektrisch untersucht werden können. Hier

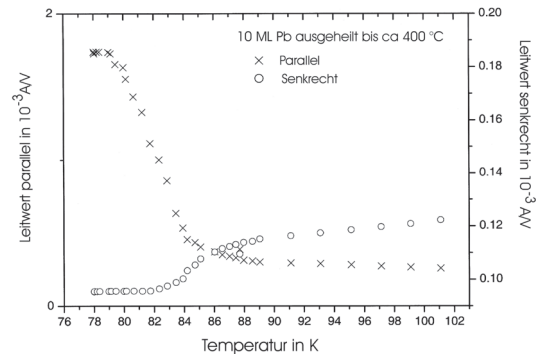


Bild 9: Nach Tempern von 10 ML bis 400°C ist der Leitwert zwischen den Richtungen parallel und senkrecht zu den Stufen stark asymmetrisch, es bilden sich also parallele Nanodrähte aus.

liegen die ersten vorläufigen Ergebnisse vor: Bild 9 zeigt, dass nach geeignetem Tempern der Leitwert parallel zu den Stufen schon bei 78 K etwa 20 Mal höher ist als der Leitwert senkrecht zu den Stufen. Hier wurden die beiden Leitwerte auf einer Schicht in zwei zueinander senkrechten Richtungen gemessen. Es wird erwartet, dass das Verhältnis bei tieferen Temperaturen noch wesentlich ansteigt, sodass eine eindimensionale Leitfähigkeit vorliegt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Messungen haben gezeigt, dass mit ultradünnen Bleischichten auf Si(111) 7×7 und Si(557) sich zweidimensionale, bzw. eindimensionale metallische Strukturen wohldefiniert herstellen lassen, die sich auch mit Gleichstrommethoden und hohen Magnetfeldern im Ultrahochvakuum bei tiefen Temperaturen elektrisch sehr gut charakterisieren lassen. Alle festgestellten Strukturparameter der Schichten haben einen quantitativ nachweisbaren Effekt auf die Transportparameter. Es wurde metallische und nichtmetallische Leitung gefunden, Quantisierungsphänomene, schwache und starke Lokalisierung und sehr starke supraleitende Fluktuationen nachgewiesen. Für die Nanodrähte werden entsprechende Resultate in naher Zukunft erwartet.

Damit erscheinen die ultradünnen Pb-Schichten auf Si(111) und Si(557) geeignet als Modellsysteme zum Studium der Leitungsphänomene in metallischen Nanostrukturen.

Literaturnachweise.

- [1] HORN-VON-HOEGEN, M., Growth of semiconductor layers studied by spot profile analysing low energy electron diffraction, Zeitschrift für Kristallographie (1999), **214**, 591-665

- [2] WOLLSCHLÄGER, PETKOVA, J., H.-L. GÜNTER & M. HENZLER, Order and disorder in ultrathin Pb films grown on Si(111)7 x 7 substrates at low temperatures” Surface Science (2001), **482-485**, 922-927.
- [3] PFENNIGSTORF, O., A. PETKOVA, H.L. GUENTER & M. HENZLER, Conduction mechanism in ultrathin metallic films, Phys.Rev.B (2002) ,**65**, 45412.
- [4] VILFAN, I., M. HENZLER, O. PFENNIGSTORF & H. PFNÜR, Anomalous thickness dependence of the Hall effect in ultrathin Pb layers on Si(111), Phys. Rev.B (2002) , **66** , 241306.
- [5] HENZLER, M. & R. ZHACHUK, The step structure of the Si(5 5 7) surface” Thin Sol. Films (2003) , **428**, 129-132.

Prof. Dr. Martin Henzler
Finkenweg 6
D-38826 Garbsen OT Schloss Ricklingen